

граммы, и является необходимым условием точного определения характеристик полей нейтронов на ядерных реакторах.

4. Для измерения флюенса нейтронов в центре металлической активной зоны быстрых реакторов с погрешностью 1—2% необходимо использовать на завершающем этапе измерений минимизированный набор детекторов нейтронов (семь типов детекторов), сечения ядерных реакций для которых известны с минимальной погрешностью, а энергетическая чувствительность перекрывает энергетический спектр исследуемого поля нейтронов. Определение активности облученных детекторов при этом должно проводиться с погрешностью не более 0,5—1,5%.

5. Изложенные в настоящей статье методы измерения флюенса нейтронов в активной зоне быстрых реакторов можно применять для измерения флюенса и на реакторах других типов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 8.105-80. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерения плотности потока и флюенса нейтронов на ядерно-физических установках. Постановление Госкомитета СССР по стандартам 19 декабря 1980 г. № 5892.
2. Севастьянов В.Д. Система моделирующих опорных полей нейтронов на исследовательских реакторах. — Атомная энергия, 2000, т. 88, вып. 5, с. 378—387.
3. Борисов Г.А., Севастьянов В.Д., Вершинин В.Г. и др. Прецизионные измерения с делющимися детекторами нейтронов в реакторе БИР-2. Тезисы докл. V Всес. сов. по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. М., НПО ВНИИФТРИ, 1990, с. 131—133.
4. Литвин В.И. Метрологическое обеспечение нейтронных измерений на ЯФУ ВНИИТФ. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2001, вып. 1/2, с. 44—48.
5. Григорьев Е.И., Трошин В.С., Ярына В.П. Подход к оценке неопределенности восстановления спектра нейтронов. — Измерительная техника, 2002, № 1, с. 66—68.
6. Севастьянов В.Д., Кошелев А.С., Маслов Г.Н., Одинцов Ю.М. Двухкомпонентное представление спектра нейтронов на быстрых исследовательских реакторах. — Атомная энергия, 1995, т. 79, вып. 2, с. 107—117.
7. Compilation of Actinide Neutron Nuclear Data. — In: KDK-35, Stockholm, 1979, p. 80.
8. Кошелев А.С., Маслов Г.Н., Петров Ю.В. КАСКАД — комплексная вычислительная программа для метода интегральных нейтронных детекторов. Тезисы докл. V Всес. сов. по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. 3—7 декабря 1990 г. М., НПО ВНИИФТРИ, 1990, с. 116—118.
9. Севастьянов В.Д., Кошелев А.С., Маслов Г.Н. Стандартное поле нейтронов в центре активной зоны БИР-2. — Атомная энергия, 1994, т. 76, вып. 1, с. 55—61.
10. Караваев Ф.М. Измерение активности пуклидов. М.: Изд-во стандартов, 1972.
11. Neutron Cross sections for Reactor Dosimetry. IAEA-208, Vienna, 1978, v. 2, p. 1—15.
12. McElroy W., Armani R., Tochilin E. The spectral distribution of neutron reaction cross section in an unreflected Uranium-235 critical assembly and the fission neutron spectrum. — Nucl. Sci. Engng, 1972, v. 48, p. 51—71.
13. Nakazawa M., Kobayashi K., Iwasaki S. et al. Integral tests for fission reactors. — In: Dosimetry Fily, JAERI 1325, p. 21—42.

Поступила в Редакцию 5.12.01

УДК 539.1.074

ПРИМЕНЕНИЕ ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ ШИРОКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ CdTe, CdZnTe и GaAs ДЛЯ КОНТРОЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС

*Ажажа В.М., Кутний В.Е., Рыбка А.В., Шляхов И.Н.,
Кутний Д.В., Захарченко А.А. (ННЦ ХФТИ)*

В последние 10 лет резко возрос интерес к широкозонным полупроводниковым соединениям CdTe, CdZnTe, GaAs в связи с возможностью создания на основе этих кристаллов детекторов ионизирующего излучения, которые имеют небольшой объем, не требуют охлаждения жидким азотом и обеспечивают высокую эффективность ре-

гистрации γ -излучения. Энергетический диапазон детектируемого ими γ -излучения составляет 20—3000 кэВ, диапазон рабочей температуры от -40 до $+50$ °С. Спектрометры γ -излучения на основе CdTe и CdZnTe имеют энергетическое разрешение несколько процентов. Эти свойства обусловлены, прежде всего, наличием широкой запрещенной зоны (1,5—2,2 эВ) и большим средним атомным номером ($Z \sim 50$).

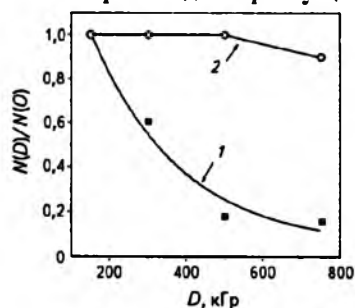
На основе сенсоров из полупроводниковых соединений CdTe (CdZnTe), GaAs в ХФТИ разработаны и изготовлены детекторы γ -излучения и блоки детектирования спектрометрического и дозиметрического назначения, а также сопутствующее электронное оборудование. Эти приборы отвечают требованиям надежности и срока службы, радиационной и температурной устойчивости. Указанные блоки детектирования предполагается использовать для радиационного контроля теплоносителя первого контура, парогенератора, протечек трубопровода на АЭС и измерения мощности дозы γ -излучения радиоактивных отходов. В настоящей работе описаны спектрометр контроля изотопного состава теплоносителя первого контура и блок аварийного контроля мощности дозы. Приводятся сведения о широкодиапазонном блоке детектирования, предназначенном для работы в составе автоматизированной системы контроля радиационной безопасности АЭС.

Радиационная стойкость детекторов на основе CdTe и CdZnTe. Детекторы ионизирующего излучения эксплуатируются в условиях, вызывающих радиационные повреждения. В полупроводниковых гамма-спектрометрах радиационные повреждения функционально вызывают ухудшение разрешения по энергии, увеличение тока утечки и сдвиг положения пика в сторону меньших значений энергии. В полупроводниковых детекторах-радиометрах ухудшаются счетные характеристики. Кроме того, в зависимости от химического состава полупроводника может происходить активация вещества в результате ядерных реакций под воздействием нейтронов и γ -квантов.

Для практического применения в системах контроля радиационной обстановки АЭС и объекта «Укрытие» крайне важно знать радиационный ресурс полупроводниковых детекторов γ -излучения. В частности, это относится к дозиметрическим детекторам на основе широкозонных полупроводников CdTe и CdZnTe. Определена и приводится поглощенная доза γ -излучения, при которой метрологические характеристики детекторов неприсмлемо изменяются [1].

Для испытаний были отобраны образцы, не обладающие спектрометрическими свойствами (выделенный фотопик отсутствовал) и предназначавшиеся для использования как в счетном, так и токовом дозиметрическом режиме. Радиационную обработку образцов проводили в поле тормозного излучения ускорителя КУТ [2].

Анализ дозовых зависимостей счетных характеристик кристаллов (рис. 1) показывает, что детектор на основе CdZnTe сохраняет чувствительность до поглощенной дозы ~ 800 кГр ($8 \cdot 10^7$ рад), в то время как радиационная деградация образцов из CdTe происходит при существенно меньшей дозе ~ 200 кГр ($2 \cdot 10^7$ рад).



Р и с. 1. Дозовая зависимость отношения счетных характеристик детекторов на основе CdTe (1) и CdZnTe (2)

Полученные в результате радиационных испытаний данные, в частности, показывают, что детекторы на основе CdZnTe можно успешно применять для дозиметрии в условиях мощности экспозиционной дозы до 2000 Р/ч с ожидаемым ресурсом не менее 10 лет. Следует особо отметить, что реальный ресурс может оказаться выше прогнозируемого, так как в условиях имитации радиационных повреждений, имевших место при испытаниях, не успевали проявляться механизмы отжига дефектов, которые возможны в условиях умеренных, но более длительных радиационных нагрузок.

Блок детектирования для контроля γ -излучения в аварийном режиме. При высокой интенсивности излу-

чения, которая может возникнуть в аварийной ситуации, предпочтительнее измерять ток, индуцированный облучением, или токовый режим работы детектора. Переход на такой режим оказывается необходимым при скорости поглощения фотонов больше 10^4 имп./с.

Разработан и испытан блок детектирования мощности экспозиционной дозы γ -излучения, работающий в токовом режиме и предназначенный для измерения мощных полей. В состав аварийного блока входят детектор на основе CdZnTe и преобразователь ток—напряжение. Блок детектирования и преобразователь соединены между собой кабелем длиной до 50 м. Во время испытаний проверяли основные технические характеристики — диапазон и предельную относительную погрешность измерения мощности экспозиционной дозы γ -излучения (рис. 2—4).

Как следует из рис. 2, выходной сигнал преобразователя линейно зависит от напряжения смещения на детекторе в интервале $U_{см} = 80—150$ В. Из рис. 3 видно, что показания блока детектирования мало зависят от пространственной ориентации прибора. Максимальная анизотропия при изменении угла падения γ -излучения от 0 до 360° вокруг оси вращения равна 11%.

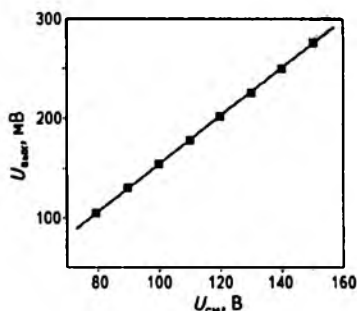
На рис. 4, а показана зависимость напряжения преобразователя с детектором на основе CdZnTe размером $5 \times 5 \times 2$ мм от мощности дозы γ -излучения ^{137}Cs . Начиная с ~ 20 Р/ч эта зависимость линейна. Аналоговая чувствительность детектора на основе CdZnTe составляет $\sim 10^{-7}$ Кл/Р. Аналогичные измерения были проведены на установке с источником большей мощности (^{60}Co , 5000 Р/ч). Как следует из рис. 4, б, при регистрации γ -излучения в токовом режиме измерения индуцированный излучением ток линейно зависит от мощности экспозиционной дозы.

Блоки детектирования будут использованы для измерения мощных полей γ -излучения при реконструкции системы контроля топливосодержащей массы «Финиш» на объекте «Укрытие».

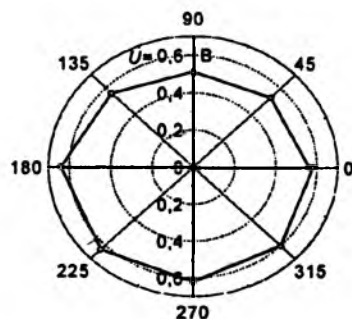
Для регистрации интенсивных полей γ -излучения в аварийном режиме работы реактора в условиях высокой температуры внутри герметичной оболочки возможно применение полупроводниковых детекторов на основе GaAs. Такие детекторы в настоящее время проходят испытания.

Спектрометрический блок детектирования для непрерывного беспробоотборного контроля изотопного состава теплоносителя ВВЭР. Под действием мощного нейтронного потока происходит активация теплоносителя первого контура охлаждения реактора. Кроме того, в теплоносителе возникают радионуклиды, образующиеся в результате реакций деления ядерного топлива. По изотопному составу можно судить о текущей [3] тепловой мощности реактора, энерговыделении в активной зоне, выгорании ядерного топлива, расходе теплоносителя, герметичности оболочек твэлов, степени загрязнения контура радиоактивными продуктами коррозии.

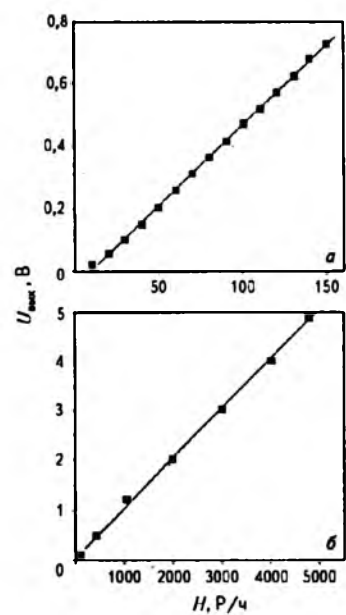
Беспробоотборный непрерывный контроль изотопного состава возможен с помощью γ -спектрометрии теплоносителя во врезанной в первый контур «байпасной» линии. Такой контроль особенно актуален на ранней стадии разгерметизации оболочек



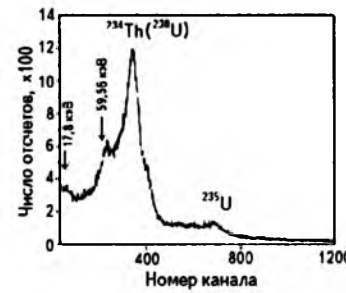
Р и с. 2. Зависимость напряжения на выходе преобразователя блока детектирования от напряжения смещения, подаваемого на полупроводниковый детектор на основе CdZnTe при мощности экспозиционной дозы 37,8 Р/ч (^{137}Cs)



Р и с. 3. Зависимость напряжения на выходе преобразователя от угла падения γ -излучения при $U_{см} = 90$ В и мощности экспозиционной дозы 422 Р/ч (^{60}Co)



Р и с. 4. Зависимость напряжения на выходе преобразователя от мощности экспозиционной дозы источника γ -излучения ^{137}Cs (а) и ^{60}Co (б)



Р и с. 5. Энергетический спектр γ -квантов топливосодержащей массы объекта «Укрытие», полученный с помощью детектора на основе CdTe без электронной коррекции сигнала

твэлов. Для этой цели перспективны полупроводниковые детекторы с широкой запрещенной зоной, которые не требуют глубокого охлаждения. Так, детекторы на основе CdTe(CdZnTe) на время измерений достаточно охладить до -40°C . Такую температуру кристалла можно обеспечить с помощью портативного термоэлектрического холодильника.

Проведен анализ измеренных от трубы с теплоносителем γ -спектров, по которым можно контролировать герметичность оболочек твэлов (см. таблицу). Эффективность регистрации оценивали по поглощению γ -излучения.

Индикаторами герметичности оболочек твэлов являются продукты деления ядерного топлива: криптон, ксенон, изотопы иода, цезия, рубидия. Именно эти продукты первыми покидают оболочку твэла при нарушении герметичности. В принципе контроль должен осуществляться по всем этим радионуклидам. Технически это не всегда выполнимо вследствие того, что γ -спектрометр имеет конечное разрешение по энергии и разную интенсивность линий. Поэтому при разработке беспробоотборных методик контроля герметичности оболочек твэлов были выбраны линии в γ -спектрах, относительный скачок интенсивности которых должен являться индикатором появления дефектов.

Разрешение CdTe-детектора на уровне 2,5% удовлетворяет требованиям, которые предъявляются к детекторам, используемым для контроля герметичности оболочки твэлов при беспробоотборном методе контроля по продуктам деления в теплоносителе. В этом случае γ -линии в спектре не перекрываются до энергии 403 кэВ и будут наблюдаться как отдельные пики. γ -Линии в диапазоне от 403 до 529 кэВ перекрываются и в спектре будут наблюдаться как мультиплетные пики. γ -Линии в диапазоне энергии от 529 до 847 кэВ также не перекрываются (рис. 5).

Эффективность регистрации детектором на основе CdTe γ -линий некоторых нуклидов, характерных для теплоносителя ВВЭР, %

Толщина кристалла, мм	Нуклид и энергия γ -квантов, кэВ						
	^{133}Xe 81	$^{85\text{m}}\text{Kr}$ 151	^{88}Kr 196	^{135}Xe 250	^{131}I 364	^{87}Kr 364	^{132}I 668
1	82	29	18	12	7	6	4
2	97	50	32	22	13	12	8
3	99	64	44	31	19	18	12
5	100	82	62	46	30	28	19
7	—	91	74	58	40	36	26
10	—	97	86	71	51	48	34

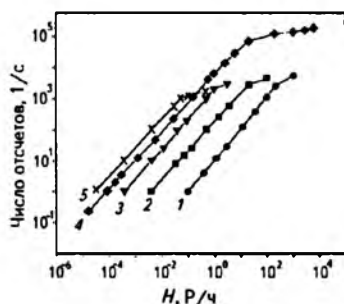
Блок детектирования γ -излучения для работы в системе контроля радиационной безопасности АЭС. Для использования в составе автоматизированной системы конт-

роля радиационной безопасности [4], предназначенной для комплексного контроля на АЭС, разработаны блоки детектирования γ -излучения. Блок детектирования мощности экспозиционной дозы (рис. 6) состоит из детектора на основе CdTe или CdZnTe, маломощного преусилителя и микропроцессорного контроллера, обеспечивающего чувствительность детектирования, независимую от спектра излучения. Этот компактный прибор с автоматической подготовкой к работе позволяет контролировать режимы работы непосредственно в процессе эксплуатации. Он обеспечивает устойчивую работу на линии связи до 500 м в широком диапазоне измеряемой мощности экспозиционной дозы — от 20 мкР/ч до 1000 Р/ч (рис. 7).

Все разработанные технические средства отвечают требованиям специальных условий поставки оборудования на АЭС, имеют гарантийное обеспечение качества, обладают высокой надежностью, сейсмостойкостью и пожаробезопасностью [4]. Блоки детектирования в составе автоматизированной системы представляют собой распределенную сеть сбора данных, которые характеризуют радиационную безопасность объекта контроля, функционирующую в реальном масштабе времени во всех режимах работы АЭС (режим нормальной эксплуатации, режим остановки реакторной установки, аварийный режим, послеварийный режим).



Р и с. 6. Общий вид и функциональные узлы блока детектирования



Р и с. 7. Сравнительные характеристики серийного блока детектирования БДМГ-41-02 (1), -03 (2), -01 (3), БДМГ-41 (5) и блока детектирования БДРГ-Т с детектором на основе CdTe (4)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутний В.Е., Рыбка А.В., Прохорсц И.М. и др. Исследование радиационной стойкости детекторов ионизирующих излучений на основе CdTe и CdZnTe. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиац. материаловед., 2000, вып. 4, с. 212—214.
2. Ayzaitsky N.I. et al. KUT — industrial technological accelerator. — Труды XIV сов. по ускорителям заряженных частиц. Протвино, октябрь 1994, т. 4, с. 259—263.
3. Егоров Ю.А. Основы радиационной безопасности атомных электростанций. Под ред. Н.А. Доллежалы. М.: Энергоатомиздат, 1982. 272 с.
4. Грибанов Ю.А., Рингис В.С., Скоромный В.Г. и др. Перспективы использования полупроводниковых материалов из CdTe (CdZnTe) при реконструкции АЭС Украины. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиац. материаловед., 2000, вып. 4, с. 203—207.

Поступила в Редакцию 12.04.02

УДК 543.257.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГРАФИТОВЫХ КЛАДОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ РЕАКТОРОВ СИБИРСКОГО ХИМИЧЕСКОГО КОМБИНАТА

Бушуев А.В., Верзилов Ю.М., Зубарев В.Н., Петрова Е.В., Алеева Т.Б., Прошин И.М., Качановский А.Е. (МИФИ), Дмитриев А.М. (Госатомнадзор РФ), Захарова Е.В., Ушаков С.И. (ИФХ РАН), Николаев А.Г., Баранов И.И., Кабанов Ю.И., Колобова Э.Н. (Сибирский химический комбинат)

К настоящему времени в нашей стране выведены из эксплуатации 10 промышленных уран-графитовых реакторов. Их кладка загрязнена радионуклидами и пред-